第40卷 第10期
2023年10月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 10
Oct. 2023

铁路高架桥对局地风动力的影响
——以敦格铁路沙山沟为例

薛承杰[1,2,3]， 张克存[1]， 安志山[1,2]， 张宏雪[1,2,3]， 潘加朋[1,2,3]

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院敦煌戈壁荒漠生态与环境研究站，甘肃 敦煌 736200；2. 中国科学院西北生态环境资源研究院沙漠与沙漠化重点实验室，甘肃 兰州 730000；3. 中国科学院大学，北京 100049）

摘 要：本文通过野外观测、室内分析计算、CFD数值模拟方法，对敦格铁路沙山沟特大桥东西两侧风动力环境特征进行研究分析。结果表明：(1) 沙山沟特大桥东西两侧春夏季起沙风主要以NW和WNW风向为主，秋冬季起沙风向主要以SE、S风为主；沙山沟特大桥西侧全年输沙势为284.19 VU，属于中等风能环境，合成输沙势为27.4 VU，合成输沙风向为124°，方向变率指数为0.10，属于小比率，风向多变。(2) 沙山沟特大桥东侧年输沙势为31.24 VU，属于低风能环境，合成输沙势为8.97 VU，合成输沙风向为91°，方向变率指数为0.29，属于中比率；沙山沟特大桥西侧平均风速、起沙风频率、输沙势、合成输沙势较大，应加强高架桥西侧沙害监测与防治；根据高架桥西侧风动力环境特点并结合流动沙丘进行模拟，分析得出桥底架空区域及桥面风速均大于起沙风速，输沙能力较强，不易产生积沙。但随着沙丘的前移，桥底架空区域产生积沙及风沙上轨可能性增大。

关键词：沙山沟；风动力环境；起沙风况；输沙势；数值模拟

敦煌-格尔木铁路(简称敦格铁路)是南连青藏铁路、北接兰新高铁、西达库格铁路的重要枢纽，对于扩大和完善西北铁路网、促进沿线地区及西藏经济发展和社会进步具有重要意义[1]。该路段全长约508 km，途经沙山沟路段长度约12.90 km。

沙山沟是阿尔金山的泄洪通道，整体呈“U”形宽谷。沟内地形相对平坦，沟谷两侧分布有大片低矮的流动沙丘及高大复合型沙丘，沙源物质丰富。其主要的沙丘类型有复合型新月形沙丘链、链状沙丘、格状沙丘及金字塔沙丘，沙丘高度普遍在10~150 m之间。沙山沟区域内旱风同季，风动力条件也较为充足。为了更加安全的穿越沙山沟流动沙丘路段，铁路建设者采取“以桥代路”的方式加以解决。“以桥代路”的方式在西北沙漠地区的铁路、公路修建中应用较为普遍，沙区高架桥尽可能地保证了输沙通道的顺畅，同时对当地原有生态环境也起到了很好的保护作用。但由于高架桥周边沙粒大量堆积且流动沙丘不断地前移，铁路高架桥也存在风蚀、沙埋的潜在隐患[2-5]。

本文根据沙山沟特大桥东西两侧野外实测风况、集沙仪数据，针对沙山沟特大桥的风沙动力环境特点加以研究分析，并模拟流动沙丘前移对高架桥两侧流场分布的影响，以揭示高架桥两侧的风沙活动规律，为铁路沙害的监测与防治提供一定的理论依据。

1 资料来源及研究方法

研究资料源于2019年12月至2020年12月期间，在距高架桥东西两侧各30 m处布设的HOBO自动气象仪所获取的风速与风向观测资料及集沙仪获取的积沙数据。HOBO自动气象仪记录数据为每10 min的平均值，观测高度距离地面2 m(图1)。

本文在野外实测的基础上借助欧拉双流体模型，分别模拟了沙丘前缘距高架桥西侧为30 m和抵近梁底时的高架桥周围流场分布特征，以此说明流动沙丘对于高架桥周围流场的影响及潜在沙害

收稿日期：2023-04-01； **修订日期**：2023-05-08
基金项目：国家自然科学基金项目(42171083)；甘肃省自然科学基金(22JR5RA066)
作者简介：薛承杰(1993-)，男，博士研究生，主要从事风沙工程研究. E-mail: Xuechengjie2022@163.com
通讯作者：张克存. E-mail: kecunzh@lzb.ac.cn





图1　观测实验地点及仪器

Fig. 1　Observation experiment sites and instruments

问题。

输沙势是衡量该区域风沙活动强度的重要指标之一,表示潜在的输沙能力,即反映风速统计中某一方向的风向在一定时间内的输沙能力,在数值上以矢量单位VU表示。目前,计算输沙势最广泛的方法是Fryberger采用的莱托方程[6-7]。

$$DP = V^2\left(V - V_t\right)t \quad (1)$$

式中:DP为输沙势(矢量单位VU);V为风速(m·s^{-1});V_t为起动风速(m·s^{-1}),起沙风速统一取5 m·s^{-1}[8-10];t为起沙风作用时间,在统计表中以频率(%)表示。

按照16个方向输沙势方向矢量叠加的方法得到合成方向称为合成输沙方向(RDD),表示输沙净走向。合成输沙方向的输沙量称为合成输沙势(RDP),表示各种风向作用下的净输沙势。合成输沙势与输沙势的比值称为方向变率指数(RDP/DP),用来反映一个地区风向组合情况[11-12],起沙风的方向变率越大,方向变率指数则越小。

2　结果与分析

2.1　平均风速与起沙风频率

高架桥两侧平均风速与起沙风频率变化趋势基本一致,都呈现出先增大后减小的趋势,5月时两者均达到最大值(图2)。但由于受到高架桥的阻挡作用,高架桥东侧平均风速及起沙风频率均低于西侧,高架桥东西两侧平均风速衰减比率普遍在25%以上。其中,5—8月春、夏季节是高架桥两侧风速衰减最为强烈的时间段,此时段两侧的起沙风频率、平均风速也均较高,说明风速越大,高架桥对于风力的削弱作用越强烈,桥梁西侧遭受风蚀作用也进一步增强。

2.2　起沙风况

起沙风向有助于认识高架桥两侧风沙运动的空间方向性。高架桥西侧起沙风向多变,尤其以夏季表现最为强烈。高架桥西侧全年以SSE、WNW、NE三个方向的起沙风为主,其三个主要风向的起沙风频率占全年风频分别为14.15%、6.01%、5.74%(图3a)。高架桥东侧全年起沙风向以NW、WNW、S为主,三个主要风向的总起沙风频率仅占全年风频的2%(图3b)。根据起沙风频率数据对比可以发现,高架桥西侧年起沙风频率总体高于东侧,即高架桥西侧显示出更易起沙的特点。

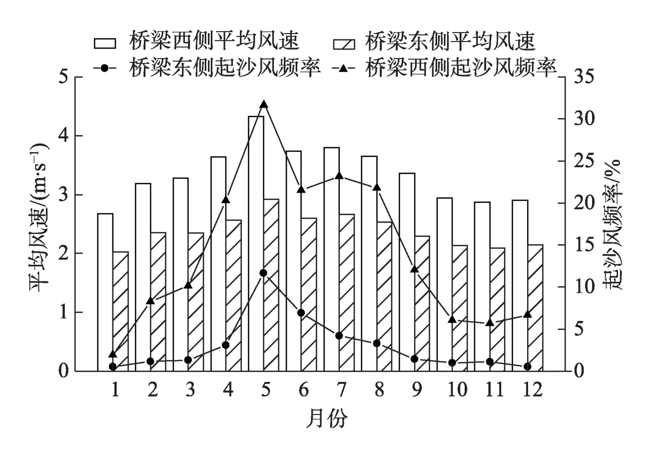


图2　沙山沟特大桥东西侧平均风速和起沙风频率月际变化

Fig. 2　Monthly variation of mean wind speed and frequency of sand-driving wind on the east and west sides of Shashangou Bridge

通过对高架桥两侧起沙风向的对比可以发现,5~6 m·s^{-1}起沙风速在全年所占比例均最大。但高架桥东西两侧年起沙风向存在部分差异,其主要原因是高架桥两侧起沙风向受高架桥影响发生偏转。高架桥西侧来自NW方向的气流由于受到桥梁的阻挡,导致部分气流偏转为SE风向,增大了SE风向的比例,使得高架桥西侧年起沙风向中SE风向频率高于东侧;高架桥东侧来自SE方向的起沙风受到桥梁的阻碍作用偏转为NW方向,高架桥东侧NW方向的起沙风频率增加。

在高架桥两侧起沙风向季节变化方面,高架桥两侧秋冬季起沙风向均以SE、S风为主,但在春夏季起沙风向存在差异。在春季时,桥梁西侧NE起沙

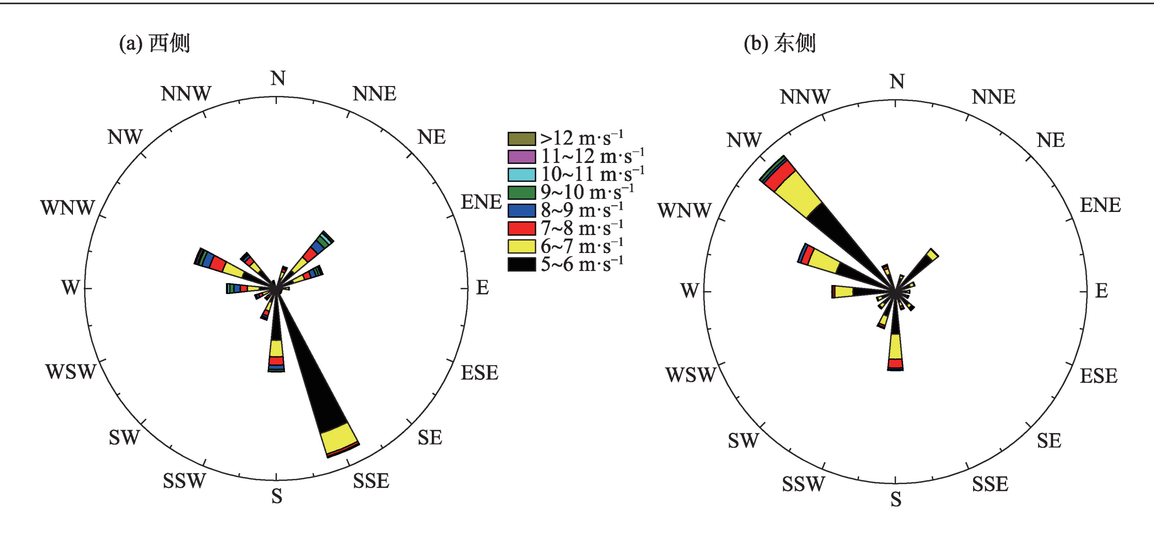


图3 沙山沟特大桥东西侧年起沙风频率分布玫瑰图

Fig. 3 Shashangou Bridge on the east and west side of the sand wind rose in the year

风向所占比例偏大，而桥梁东侧起沙风向主要以NW方向为主。夏季时，桥梁西侧起沙风向多变且WNW起沙风向所占比重明显增加，桥梁东侧起沙风向较为单一，仍以NW起沙风为主。

2.3 输沙势

沙山沟特大桥西侧全年输沙势为284.19 VU，属于中等风能环境，合成输沙势为27.45 VU，合成输沙风向为124°，方向变率指数为0.10，属于小比率(图4a)。在全年多风向风能环境中，来自NE方向的风能占19.83%，来自WWN方向和W方向的风能分别占15.58%和11.44%，因此，沙山沟特大桥西侧主要风能来自东北和西北，且东北居多。东北方向输沙能力最强，尤其以春季时段9~10 m·s^{-1}风速输沙势最大(图5a)。在季节变化上，高架桥西侧夏季输沙势最大，达到145.39 VU(图5b)。春、夏季节风向变率指数偏小，即风向变化较多。秋冬季节风向变率指数属于中比率，风向相对较为单一，主要以SE、S风向为主。秋冬季节WNW方向输沙能力虽然也普遍较强，其中在7~8 m·s^{-1}风速条件下输沙能力最强(图5c)，但冬季时SSE方向和S方向输沙能力也逐渐增强，分别在5~6 m·s^{-1}和8~9 m·s^{-1}风速时达到最大输沙(图5d)。

沙山沟特大桥东侧年输沙势为31.24 VU，属于低风能环境，合成输沙势为8.97 VU，合成输沙风向为91°，方向变率指数为0.29，属于中比率(图4b)，方向变率指数相对于高架桥西侧偏大，风向相对单一。在季节变化上，高架桥东侧夏季时输沙势也达到最大，为13.78 VU。在多风向风能环境中，来自NW方向的风能占21.77%，来自S方向和WNW方向的风能分别占14.88%和12.65%，因此，沙山沟特

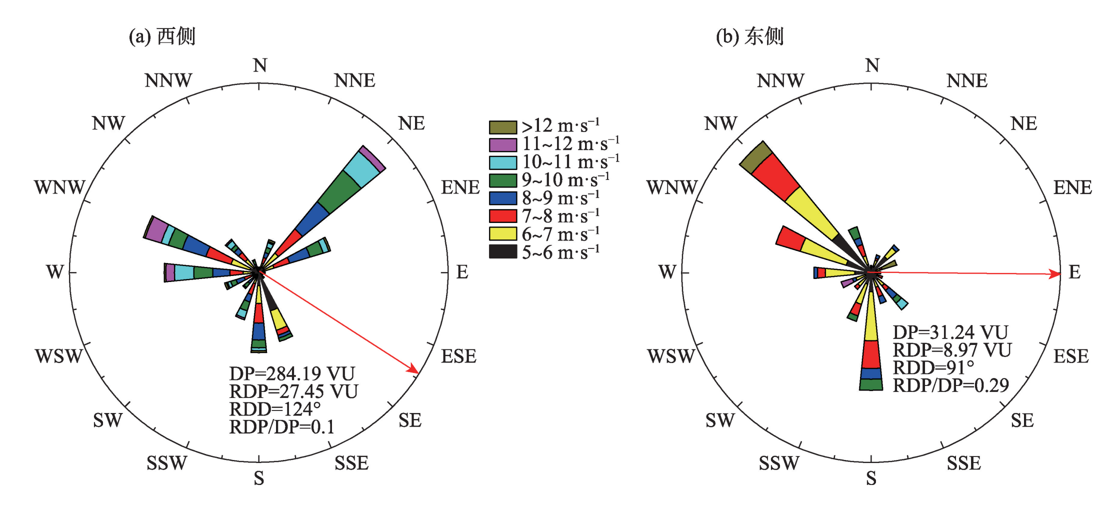


图4 沙山沟特大桥东西侧年输沙势

Fig. 4 Annual sediment transport potential on the east and west sides of Shashangou Bridge

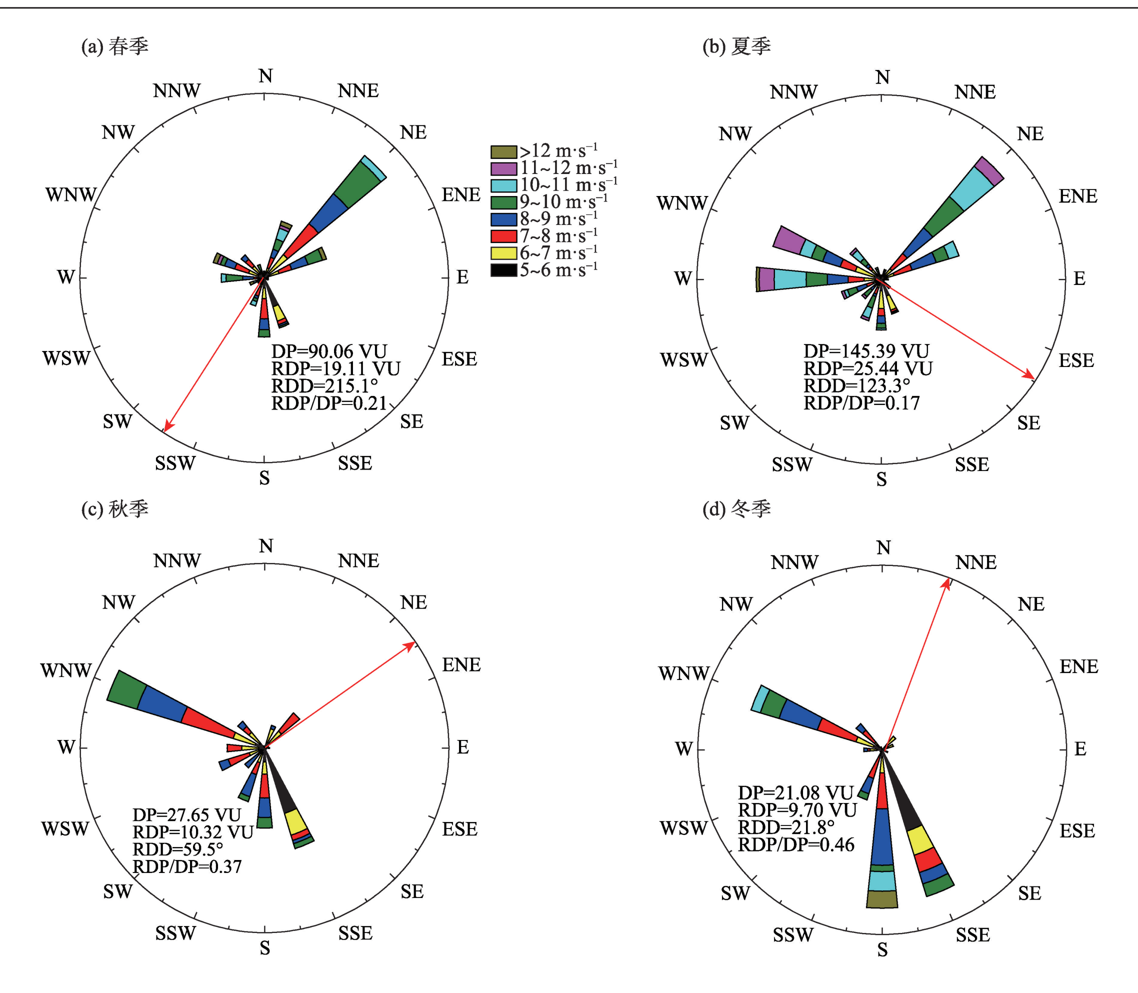


图5　沙山沟特大桥西侧各季节输沙势

Fig. 5　Sediment transport potential in different seasons on the west side of Shashangou Bridge

大桥东侧主要风能来自西北和偏南方向,且西北方向居多。春季方向变率指数较小,指示风向多变,且春季S方向输沙能力最强,尤其以6~7 $m \cdot s^{-1}$风速时输沙势最大(图6a)。夏、秋、冬三个季节的风向变率指数属于中比率,其中,夏季时方向变率指数最大,指示风向相对较为单一。夏季主要以WN和WNW风向为主且WNW方向输沙能力较强,其中,在7~8 $m \cdot s^{-1}$风速条件下输沙能力最强(图6b)。秋、冬季节输沙势最小,但同样显示出S及SSE风向输沙作用增强的趋势,尤其是7~8 $m \cdot s^{-1}$风速时输沙作用最为强烈(图6c、图6d)。

高架桥两侧年合成输沙方向均以E为主,这与高架桥周围风沙流实际运动方向较为一致,但两侧不同季节的合成输沙方向略有不同。高架桥西侧春季时的合成输沙方向为SSW,其他季节合成输沙方向大致均为E;高架桥东侧冬季时的合成输沙方向为W,而春、夏、秋三个季节的合成输沙方向大致均为E。结合高架桥两侧的起沙风分布情况,春季时,桥梁西侧沙粒总体往SW方向聚集,桥梁东侧沙粒总体往E方向运动,桥底架空区域不易积沙;冬季时,沙粒向桥底架空区域靠拢,积沙可能性增大。

3　高架桥两侧流场分布特征

研究区桥底净空高度约11 m,桥面宽度为5.5 m,桥面厚度约0.5 m,桥梁底部宽2.5 m,桥梁外观结构属于T型梁。高架桥周边流动沙丘分布广泛,流动沙丘距高架桥水平距离约30 m,沙丘高度近10 m,沙丘底部宽度约60 m。根据前人对该区域风速廓线的研究[5],该区域摩阻风速u_*选定为0.37 $m \cdot s^{-1}$,粗糙度系数Z_0为0.095 cm,卡曼常数k取0.4。结合前文高架桥东西两侧风动力环境特点,本文选取单一正交风向条件下,流动沙丘背风侧,即高架桥两侧流场分布特征进行数值模拟研究[13-15]。

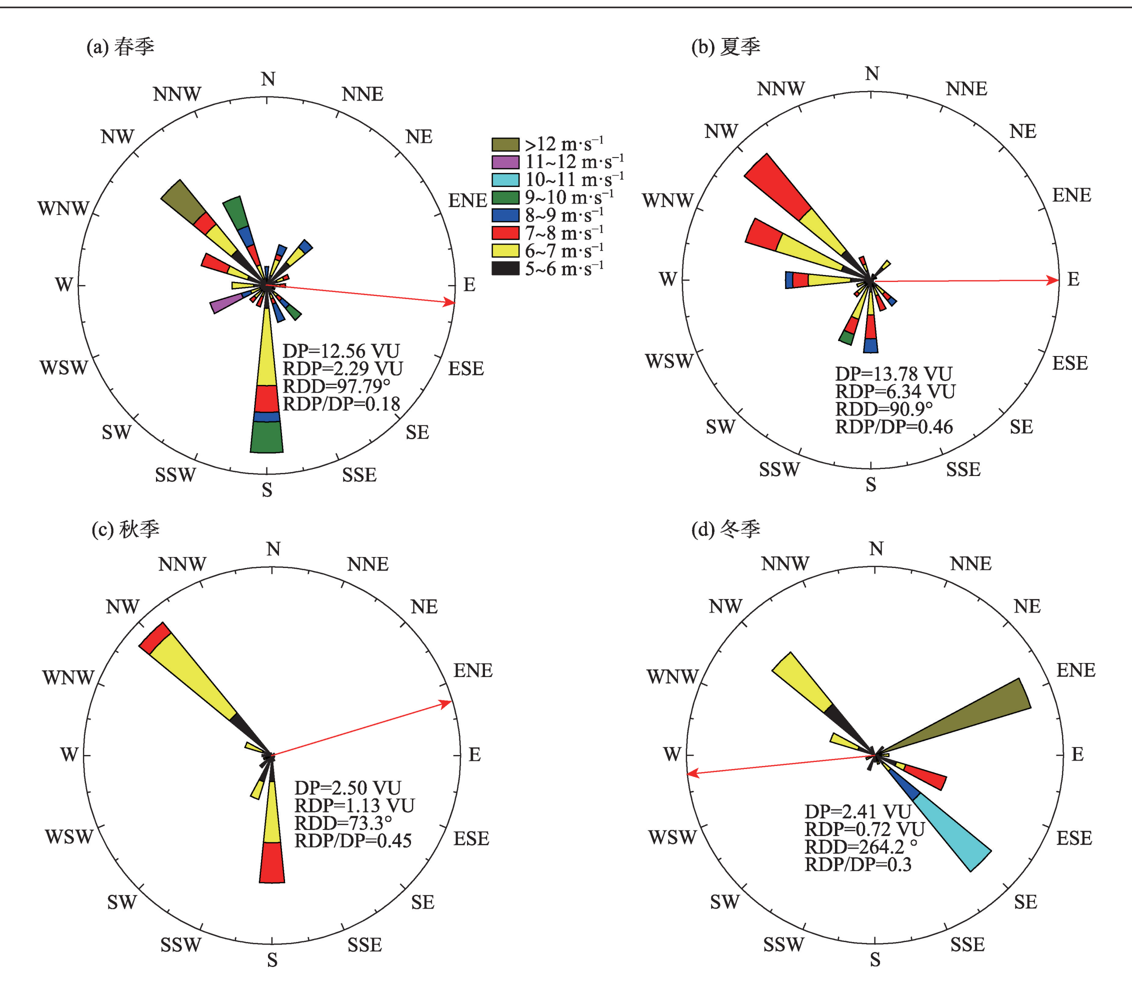
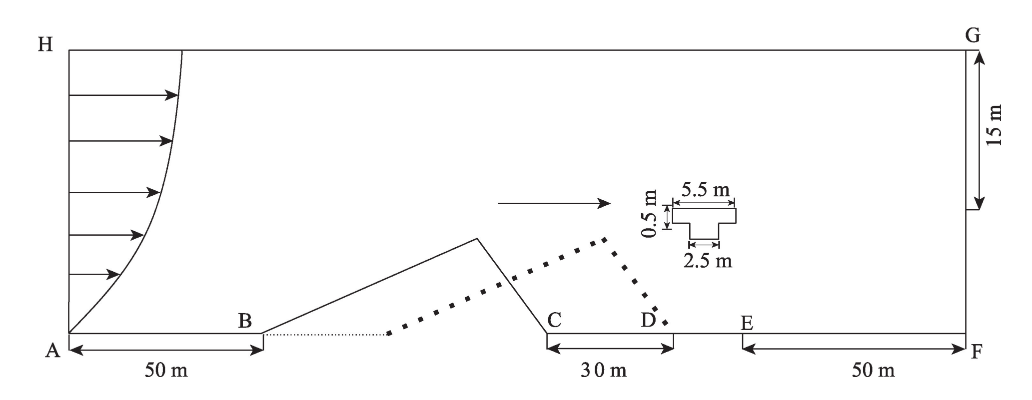


图6 沙山沟特大桥东侧各季节输沙势

Fig. 6 Sediment transport potential in different seasons on the east side of Shashangou Bridge

由于风沙流在运动过程中主要受到水平和垂直两个方向的作用力,因此,采用二维模型进行模拟分析。本文为了更好地与高架桥周围实际流场及积沙情况相吻合,按1:1比例进行高架桥几何建模。其计算域尺寸为195.5 m × 30 m,该计算域可以保证湍流充分发展(图7)。计算域左侧边界为风沙两相流的入口,定义为速度进口边界条件(VELOCITY_INLET);右侧为风沙流出口边界,定义为湍流完全发展出流边界条件(OUT_FLOW);沙丘表面及地面定义为无滑移壁面(WALL),计算域顶部采用对称边界条件(SYMMETRY);介质类型为FLUID。网格划分类型采用四边形网格和三角形网格混合的



注:AH和FG表示流体域高度;AB表示沙丘前缘距风速廓线距离;CD表示沙丘与高架桥间距。

图7 计算域

Fig. 7 Computing domain

形式(Quad/Tri),划分方法采用Pave法,即将区域划分为非结构性网格。入口处风速随高程分布符合对数分布规律,满足如下公式:

$$u = u_*/k \cdot \ln(Z/Z_0) \tag{2}$$

式中:u为入口处不同高度处风速(m·s^{-1});u_*为摩阻风速,本文取值为0.37 m·s^{-1};k为卡曼常数,一般取值为0.4;Z代表不同风速对应的距离地面垂直高度(cm);Z_0代表粗糙度系数,本文取值为0.095 cm;入口处湍流强度设置为5%,入口处沙粒相体积分数为0.02[16-18]。

风沙流在流经高架桥时,由于桥洞的导流作用加之受到桥洞底部"狭管效应"的影响[19-22],桥底净空区域会形成加速区,其最大风速约为14 m·s^{-1},因此,桥底净空区域具有较强的输沙能力(图8a)。但由于沙丘背风侧为风速减速区,风速远低于起沙风速,大量沙粒在越过沙丘之后逐渐堆积在沙丘前缘,容易造成桥洞堵塞,影响输沙(图8b);随着沙丘的前移,桥面风速也逐渐降低导致桥面低速区范围扩大,桥面易出现积沙现象;同时,由于受到高架桥的阻碍作用,在高架桥两侧附近也分别会形成减速区,但范围存在差异。高架桥迎风侧减速区范围受沙丘前移影响程度较小,约0.5 m左右。高架桥背风侧减速区范围随沙丘的移动从10 m扩展到30 m,涡流区范围变大,背风侧风速降低程度更加明显,涡流导致风沙上轨的可能性也进一步变大[23-25]。

结合高架桥周围分布有大量新月形沙丘及链状沙丘的地形特点,沙丘的前移运动对于铁路高架桥导风、输沙存在潜在威胁。鉴于此,需要有针对性的在流动沙丘前缘布置阻沙栅栏、阻沙网、草方格沙障等阻沙措施[26-30],并做好流动沙丘动态变化监测工作。

4 讨 论

沙山沟特大桥路段属于干旱荒漠气候区,秋冬季节相对湿度整体高于春夏季节,导致秋冬季节地表沙层含水量相对偏大,起沙风风速变大,同时秋冬季节平均风速偏小,导致秋冬季节起沙风频率较低。相反春夏季时段,气温偏高、蒸发量大,沙层含水量较小,起沙风速减小的同时平均风速又偏大,导致起沙风频率相对偏高(图9)。这与大桥两侧输沙势计算在春夏季时段较高的结果相一致。

沙山沟特大桥两侧NW、W方向的输沙势及输沙通量均较大,即高架桥NW方向输沙能力较强,潜在沙害威胁也较大(图10)。原因是铁路高架桥西侧毗邻库姆塔格沙漠,流动沙丘分布广泛,沙源极为丰富。同时,铁路高架桥西侧夏季多西北风且夏季起沙风频率较大,空气湿度较低即"风旱同期",为地表风蚀及风沙活动提供了较为充足的动力条件[30-33]。

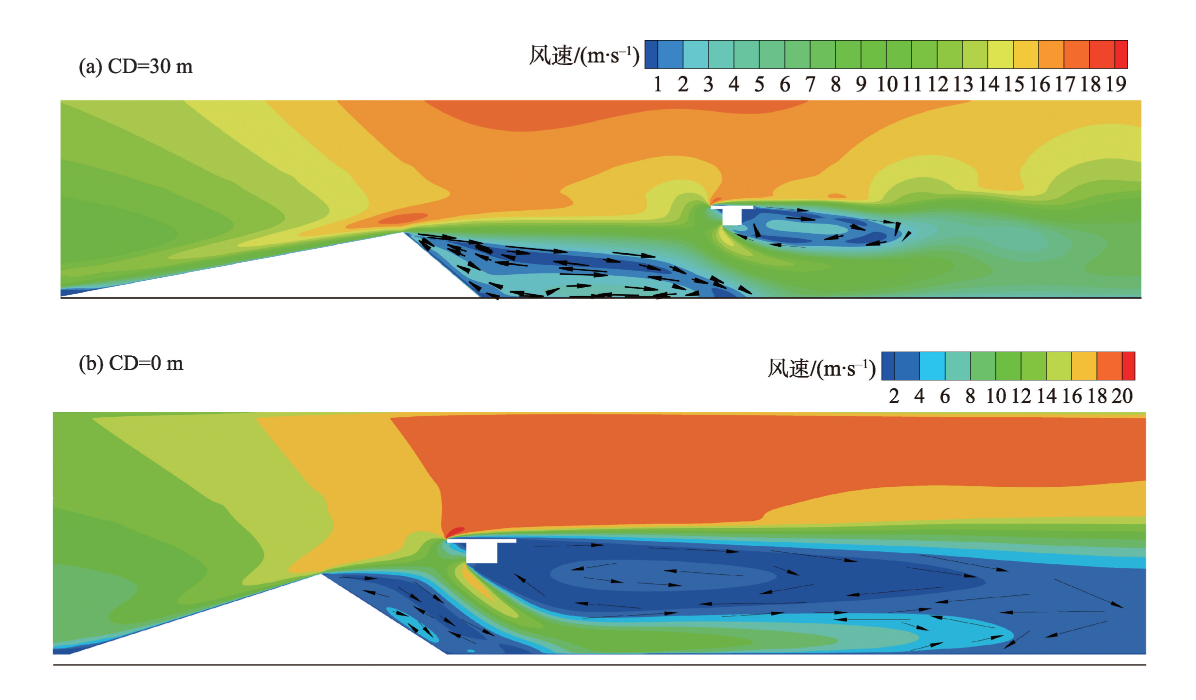


图8　高架桥两侧流场分布

Fig. 8　Flow field distribution on both sides of viaduct

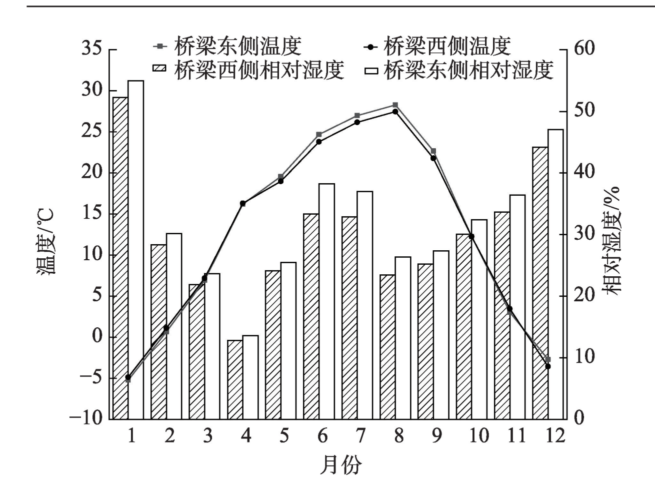


图9 沙山沟特大桥相对湿度和温度月际变化

Fig. 9 Monthly variation of relative humidity and temperature of Shashangou Bridge

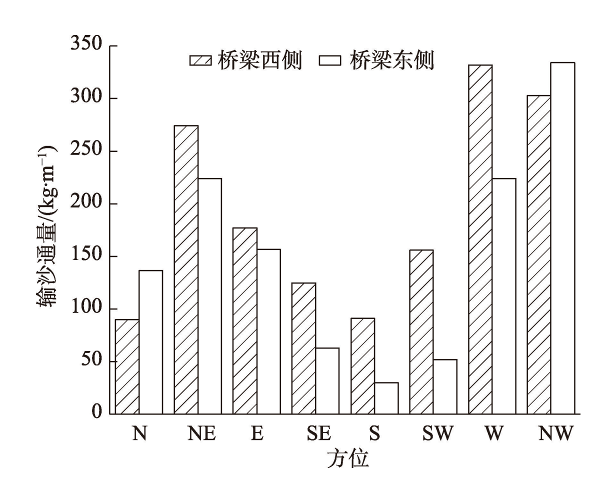


图10 沙山沟特大桥两侧输沙通量

Fig. 10 Annual sediment transport quantity and flux of Shashangou Bridge

风速的增加也使得流动沙丘前移速率增大，高架桥周围流场发生变化即高架桥周围低速区、涡流区范围变大，易造成桥底沙粒沉积、桥面风沙上轨，严重时影响行车安全。根据风沙流的时空分布特点，夏季时段是高架桥西侧沙害高发期。

5 结 论

（1）沙山沟特大桥两侧春夏季起沙风向均以NW、WNW风向为主，秋冬季节时起沙风向以SSE、S风向为主。两侧的风季都主要集中于夏季，且夏季时段大桥两侧都存在较强的输沙势及输沙通量且以NW方向为主。由于大桥西侧毗邻库姆塔格沙漠，沙源极为丰富，且西侧的平均风速、起沙风频率也均高于东侧，导致大桥西侧更易起沙，潜在沙害威胁较大。

（2）结合沙山沟特大桥周边风动力环境及流场分布特征，借助数值模拟分析可以得出，随时间推移，沙粒会大量在沙丘前缘堆积并逐渐向高架桥靠近，前移的流动沙丘易造成桥洞通风不畅及风沙上轨。因此，对于周边流动沙丘应铺设草方格、阻沙栅栏，铁路高架桥沿线宜设置挡沙墙等防护措施，并监测流动沙丘动态变化。

参考文献（References）：

[1] 姚宏乐. 敦煌-格尔木铁路高大沙丘区的风沙环境特征及风沙危害综合防护体系[J]. 中国沙漠, 2015, 35(3): 555-564. [Yao Hongle. The blown sand characteristics and sand hazards comprehensive protective system at the sand dune areas along the Dun-Ge Railway[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(3): 555-564.]

[2] 闫满存, 王光谦, 董光荣, 等. 巴丹吉林沙漠沙山发育与环境演变研究[J]. 中国沙漠, 2001, 21(4): 361-366. [Yan Mancun, Wang Guangqian, Dong Guangrong, et al. Study on Mega Dunes development and environmental change in Badain Jaran desert[J]. Journal of Desert Research, 2001, 21(4): 361-366.]

[3] 张伟民, 王涛. 巴丹吉林沙漠高大沙山形成演化初步探讨[J]. 中国沙漠, 2005, 25(2): 281-286. [Zhang Weimin, Wang Tao. Approach to formation and evolution of megadunes in Badain Jaran desert[J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(2): 281-286.]

[4] 张毅. 敦格铁路与青藏铁路接轨线路方案研究[J]. 铁道标准设计, 2009(7): 10-14. [Zhang Yi. Research on alignment plan of Dunge Railway and Qinghai-Tibet Railway[J]. Railway Standard Design, 2009(7): 10-14.]

[5] 王文博. 敦格铁路沙山沟特大桥风荷载计算方法[J]. 铁道建筑, 2020, 60(11): 12-15. [Wang Wenbo. Wind load calculation of Shashangou bridge on Dunhuang-Golmud railway[J]. Railway Construction, 2020, 60(11): 12-15.]

[6] 谢胜波, 喻文波, 屈建军, 等. 青藏高原红梁河风沙动力环境特征[J]. 中国沙漠, 2018, 38(2): 219-224. [Xie Shengbo, Yu Wenbo, Qu Jianjun, et al. Dynamic environment of blown sand at Hongliang river of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(2): 219-224.]

[7] 鱼燕萍, 张克存, 安志山, 等. 敦煌-格尔木铁路沿线风动力环境特征[J]. 中国沙漠, 2020, 40(1): 41-48. [Yu Yanping, Zhang Kecun, An Zhishan, et al. Dynamic environment of wind along the Dunhuang-Golmud railway[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(1): 41-48.]

[8] 张正偲, 董治宝, 赵爱国, 等. 输沙量与输沙势的关系[J]. 中国沙漠, 2011, 31(4): 824-827. [Zhang Zhengcai, Dong Zhibao, Zhao Aiguo, et al. Relationship between sediment yield and sediment potential[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(4): 824-827.]

[9] 凌裕泉. 最大可能输沙量的工程计算[J]. 中国沙漠, 1997, 17(4): 362−368. [Ling Yuquan. Engineering calculation of maximum possible sediment transport[J]. Journal of Desert Research, 1997, 17 (4): 362−368.]

[10] 蔡迪文, 张克存, 安志山, 等. 青藏铁路格拉段风动力环境及其对铁路沙害的影响[J]. 中国沙漠, 2017, 37(1): 40−47. [Cai Diwen, Zhang Kecun, An Zhishan, et al. Wind energy environments and its impacts on railway sand hazards along Gerlha section of the Qinghai-Tibet railway[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37 (1): 40−47.]

[11] 董治宝, 屈建军, 钱广强, 等. 库姆塔格沙漠风沙地貌区划[J]. 中国沙漠, 2011, 31(4): 805−814. [Dong Zhibao, Qu Jianjun, Qian Guangqiang, et al. Aeolian geomorphological regionalization of the Kumtagh Desert[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(4): 805−814.]

[12] 张龙飞. 敦格铁路小柴旦至饮马峡段风沙病害分析[J]. 四川建筑, 2009(6): 81−82. [Zhang Longfei. Analysis of wind-sand disease in Xiaochaidan to Yinmaxia section of Dunge Railway[J]. Sichuan Architecture, 2009, 29(6): 81−82.]

[13] 王旭. 敦格铁路塞什腾山区的地质构造特征[J]. 科技资讯, 2012 (36): 30−31. [Wang Xu. Geological structure characteristics of the Seshiteng Mountain area of Dunge railway[J]. Science and Technology Information, 2012(36): 30−31.]

[14] 田禾, 屈建军, 杨根生, 等. 敦−格铁路途经库姆塔格沙漠东缘高大沙山区可行性研究[J]. 中国沙漠, 2012, 32(1): 1−8. [Tian He, Qu Jianjun, Yang Gensheng, et al. Study on the feasibility of Dunhuang- Golmud railway crossing the megadunes area at the east edge of Kumtagh Desert[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(1): 1−8.]

[15] 谢胜波, 屈建军. 青藏铁路主要沙害路段治理技术及成效[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(7): 105−110. [Xie Shengbo, Qu Jianjun. Sand damage control and effect at main sections of Qinghai-Tibet Railway[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(7): 105−110.]

[16] 李良英, 石龙, 蒋富强, 等. 青藏铁路巴索曲特大桥沙害形成原因分析[J]. 铁道学报, 2016, 38(12): 111−117. [Li Liangying, Shi Long, Jiang Fuqiang, et al. Analysis of formation causes of sand disasters on basuoqu bridge of Qinghai-Tibet railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(12): 111−117.]

[17] 师景瑞, 石龙. 风沙地区低净空桥梁下部流场结构及积沙特征分析[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(9): 111−115. [Shi Jingrui, Shi Long. Analysis of flow field structure and sand accumulation characteristics under low clearance bridge in windblown sand area[J]. Railway Standard Design, 2022, 66(9): 111−115.]

[18] 张亚宾, 刘文晓. 风沙流对青藏铁路路基影响的研究[J]. 中国建材科技, 2017, 26(3): 88−89. [Zhang Yabin, Liu Wenxiao. Study on the influence of wind-blown sand on Qinghai-Tibet railway subgrade[J]. China Building Materials Science and Technology, 2017, 26(3): 88−89.]

[19] Jiyan L I, Zhibao D, Guangqiang Q, et al. Pattern analysis of a linear dune field on the northern margin of Qarhan Salt Lake, northwestern China[J]. Journal of Arid Land, 2016, 8(5): 670−680.

[20] Fryberger S G. Dunes forms and wind regime[J]. A Study of Global Sand Seas, 1979, 1052: 137−169

[21] Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes[M]. 1973.

[22] 张克存, 奥迎焕, 屈建军, 等. 巴丹吉林沙漠湖泊−沙山近地表风沙动力环境[J]. 干旱区地理, 2013, 36(5): 790−794. [Zhang Kecun, Ao Yinghuan, Qu Jianjun, et al. Dynamical environments of wind-blown sand near lakes surrounded by sand-mountains in the Badain Jaran Desert[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(5): 790−794.]

[23] 郑伟, 郑新倩, 刘娅楠, 等. 塔里木盆地南缘风动力环境研究[J]. 新疆师范大学学报(自然科学版), 2018, 37(2): 44−49. [Zheng Wei, Zheng Xinqian, Liu Yanan, et al. Study of dynamical environments over southern margin of the Tarim Basin[J]. Journal of Xinjiang Normal University (Natural Science Edition), 2018, 37(2): 44−49.]

[24] 刘伟琦, 马绍休, 宫毓来, 等. 农业干旱业务化监测研究进展与展望[J]. 中国沙漠, 2023, 43(1): 197−211. [Liu Weiqi, Ma Shaoxiu, Gong Yulai, et al. Research progress and perspective for operationalization of agricultural drought monitoring[J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(1): 197−211.]

[25] 王文博, 黄宁, 顿洪超. 沙丘背风侧不同铁路结构形式对风沙环境的适应性分析[J]. 力学学报, 2020, 52(3): 680−688. [Wang Wenbo, Huang Ning, Dun Hongchao. Analysis of wind- sand movement over sand dune with different railway forms downstream[J]. Chinese Journal of Mechanical Mechanics, 2020, 52(3): 680−688.]

[26] 梁晓磊, 牛清河, 安志山, 等. 甘肃瓜州锁阳城南雅丹地貌区起沙风况与输沙势特征[J]. 中国沙漠, 2019, 39(3): 48−55. [Liang Xiaolei, Niu Qinghe, An Zhishan, et al. Sand-driving wind regime and sand drift potential in the Yardang landform areas of southern Suoyang Town, Guazhou, Gansu[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(3): 48−55.]

[27] 杨兴华, 何清, 阿吉古丽·沙依提, 等. 塔克拉玛干沙漠北缘荒漠过渡带风沙流结构特征分析[J]. 干旱区研究, 2012, 29(4): 699−704. [Yang Xinghua, He Qing, Ajiguri Saiti, et al. Study on structure of wind-blown sand flow over the desert ecotone in the northern marginal zone of the Taklimakan Desert[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(4): 699−704.]

[28] 殷代英, 屈建军, 韩庆杰, 等. 青藏铁路错那湖段风沙活动强度特征分析[J].中国沙漠, 2013, 33(1): 9−15. [Yin Daiying, Qu Jianjun, Han Qingjie, et al. Wind-blown sand activity intensity in Cuonahu Lake section of Qinghai-Tibet railway[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(1): 9−15.]

[29] 张克存, 牛清河, 安志山, 等. 敦煌沙漠−绿洲过渡带近地表风沙动力环境[J]. 水土保持通报, 2015, 35(4): 8−11, 17. [Zhang Kecun, Niu Qinghe, An Zhishan, et al. Aeolian dynamics environ-

ments near earth surface in desert-oasis transitional zone of Dunhuang area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35 (4): 8−11, 17.]

[30] 罗劲文. 浅谈敦煌至格尔木铁路风沙地区选线[J]. 科技资讯, 2013(3): 31−32. [Luo Jinwen. A brief discussion on the selection of railway line in the wind-sand area from Dunhuang to Golmud[J]. Science and Technology Information, 2013(3): 31−32.]

[31] 胡菲, 张克存, 安志山, 等. 敦煌沙漠、绿洲和戈壁地表风动力环境特征同步对比[J]. 中国沙漠, 2020, 40(4): 113−119. [Hu Fei, Zhang Kecun, An Zhishan, et al. Comparison of wind dynamic environment among desert, oasis and gobi[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(4): 113−119.]

[32] 朱朝云, 丁国栋, 杨明远. 风沙物理学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1992. [Zhu Chaoyun, Ding Guodong, Yang Mingyuan. Physics of Aeolian Sand[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1992.]

[33] 蔡东旭, 李生宇, 王海峰, 等. 新疆S214公路台特玛湖干涸湖盆段风沙危害及防治[J]. 中国沙漠, 2020, 40(1): 1−11. [Cai Dongxu, Li Shengyu, Wang Haifeng, et al. Aeolian hazard and comprehensive protection of S214 highway in Taitema Playa, Xinjiang, China[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(1): 1−11.]

Influences of railway viaducts on local wind power: A case study of the Shashangou Bridge used by the Dunge Railway

XUE Chengjie[1,2,3], ZHANG Kecun[1], AN Zhishan[1,2],
ZHANG Hongxue[1,2,3], PAN Jiapeng[1,2,3]

(1. Dunhuang Gobi Desert Ecology and Environment Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Dunhuang 736200, Gansu, China; 2. Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The dynamic wind environment characteristics on the east and west sides of the Shashangou Bridge used by the Dunge Railway were investigated using field observations, indoor analysis, and CFD numerical simulations. The results show that the sand-driving winds on the east and west sides of Shashangou Bridge were mainly NW and WNW winds in the spring and summer, and SE and S winds in the autumn and winter. The annual sand transport potential on the west side of Shashangou Bridge is 284.19 VU, which indicates a medium wind energy environment. The sand transport potential was determined to be 27.4 VU, and the sand transport with the wind direction was 124°. The directional variability index is 0.10, which indicates a small ratio and variable wind direction. The sediment transport potential on the east side of Shashangou Bridge is 31.24 VU, indicating a low wind energy environment. The results of the sediment transport potential were 8.97 VU, while the results of the sediment transport wind direction were 91°, and the directional variability index was 0.29, indicating a medium ratio. The average wind speed, frequency of sand-driving wind, sand transport potential, and resultant sand transport potential on the west side of Shashangou Bridge were larger, indicating that the monitoring and control of sand damage on the west side of the bridge should be improved. According to the characteristics of the wind dynamic environment on the west side of the bridge when combined with the flowing dune, the numerical simulation analysis results show that the wind speed in the overhead area and bridge deck is greater than the sand-driving wind speed, and the sand transport capacity was strong, indicating that sand accumulation does not readily occur. However, with the advance of sand dunes, the possibility of sand accumulation at the bottom of the bridge and wind sand on the rail increases.

Keywords: Shashangou; wind dynamic environment; sand-driving wind regime; sediment transport potential; numerical simulation